

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU ⁽¹¹⁾ **2 548 293** ⁽¹³⁾ C2ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(51) МПК

[H01J 49/02 \(2006.01\)](#)[G01N 24/10 \(2006.01\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: прекратил действие, но может быть восстановлен (последнее изменение статуса:
27.12.2016)
Пошлина: учтена за 3 год с 12.04.2015 по 11.04.2016

(21)(22) Заявка: [2013116713/07](#), 11.04.2013(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
11.04.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 11.04.2013

(43) Дата публикации заявки: 20.10.2014 Бюл. №
[29](#)(45) Опубликовано: [20.04.2015](#) Бюл. № [11](#)(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: SU 1739751A1, 10.10.1995. SU
1006985A, 23.03.1983. US 6472874B1,
29.10.2002. JPH 09285456A, 04.11.1997

Адрес для переписки:

620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51,
Уральский федеральный университет, зам.
проректора по науке Иванову А.О.

(72) Автор(ы):

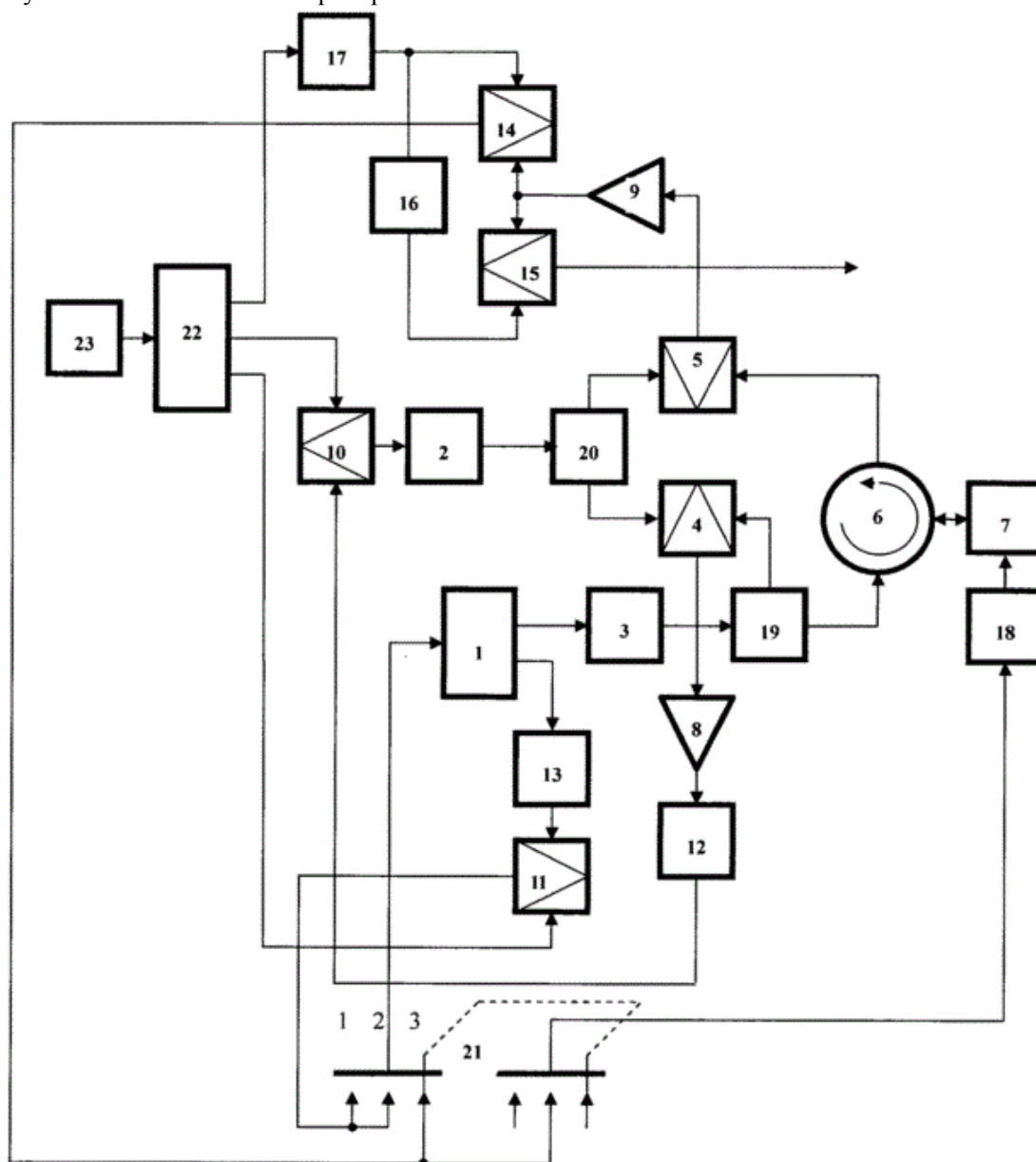
Рокеах Александр Ицкович (RU),
Артёмов Михаил Юрьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.
Ельцина" (RU),
Общество с ограниченной
ответственностью "Спектр" (RU)(54) КОГЕРЕНТНЫЙ СУПЕРГЕТЕРОДИННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ЭЛЕКТРОННОГО
ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

(57) Реферат:

Изобретение относится к технической физике и может быть использовано при изготовлении спектрометров электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Спектрометр содержит сигнальный 1 и гетеродинный 2 генераторы СВЧ, измерительный аттенюатор 3, смесители опорного 4 и сигнального 5 каналов, циркулятор 6 с измерительным резонатором 7, УПЧ 8 опорного и УПЧ 9 сигнального каналов, фазочастотные дискриминаторы 10 и 11, делители частоты 12 и 13, синхронные детекторы 14 и 15, фазовращатели 16 и 17, элемент перестройки резонансной частоты измерительного резонатора 18, делители СВЧ мощности 19 и 20, трехпозиционный переключатель 21 режимов работы, устройство синтеза опорных частот 22, опорный генератор 23. Технический результат - упрощение устройства, уменьшение его габаритов, снижение потребляемой мощности и фазовых



Изобретение относится к технической физике и может быть использовано при изготовлении спектрометров электронного парамагнитного резонанса (ЭПР).

Известен спектрометр ЭПР (Guy Rogeret al. Use of a digital PLL in an ESR heterodyne spectrometer // T. Phys R: Sci Instrum, 1981, v.14, p.335-338.), содержащий гетеродинный и сигнальный генераторы СВЧ, смесители опорного и сигнального каналов, циркулятор с измерительным резонатором, измерительный attenuator. СВЧ-фазовращатель, частотный дискриминатор на основе эталонного высокочастотного резонатора, модуляционную систему автоподстройки частоты сигнального генератора СВЧ, усилители промежуточной частоты (УПЧ) опорного и сигнального каналов, синхронный детектор промежуточной частоты, систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) гетеродинного генератора с высокостабильным опорным источником промежуточной частоты и переключатель режимов работы, причем выход гетеродинного генератора соединен с гетеродинным входом смесителя опорного канала и с фазовращателем, выход которого соединен с гетеродинным входом смесителя сигнального канала, выход сигнального генератора соединен с сигнальным входом смесителя опорного сигнала, входом частотного дискриминатора и входом измерительного attenuатора, первое плечо циркулятора соединено с выходом измерительного attenuатора, второе с измерительным резонатором, а третье с сигнальным входом смесителя сигнального канала, выход смесителя сигнального канала соединен с входом УПЧ сигнального канала, а его выход - с сигнальным входом синхронного детектора промежуточной частоты, выход смесителя опорного канала соединен с входом системы фазовой автоподстройки гетеродинного генератора СВЧ и с входом УПЧ опорного канала, выход УПЧ опорного канала соединен с опорным входом синхронного детектора промежуточной частоты, вход

модуляционной системы автоподстройки частоты через переключатель режимов работы соединен либо с выходом частотного дискриминатора, либо с выходом синхронного детектора промежуточной частоты, а ее выход соединен с управляющим электродом сигнального генератора, выход системы фазовой автоподстройки гетеродинного генератора СВЧ соединен с его управляющим электродом.

Однако этот спектрометр сложен в настройке, что связано с необходимостью подбора нужных фазовых соотношений при помощи регулируемого СВЧ-фазовращателя для каждой установки измерительного аттенюатора, обладает недостаточной стабильностью, связанной с независимостью настройки потенциально нестабильных СВЧ-фазовращателя и измерительного аттенюатора; недостаточной разрешающей способностью, что связано с использованием модуляционной системы автоподстройки частоты, снижающей спектральную чистоту СВЧ сигнала, но необходимой при непостоянных фазовых соотношениях, в устройстве для различных установок измерительного аттенюатора

Наиболее близким к изобретению является спектрометр ЭПР (Патент SU №1739751, МПК⁶ G01N 24/10, опубл. 10.10.1995), содержащий сигнальный и гетеродинный генераторы СВЧ, измерительный резонатор, смесители опорного и сигнального каналов, циркулятор, измерительный резонатор, УПЧ опорного и сигнального каналов, два фазовых дискриминатора, высокостабильный опорный генератор, два синхронных детектора, два фазовращателя, третий смеситель, третий УПЧ, генератор гармоник, переключатель режимов работы и элемент перестройки резонансной частоты измерительного резонатора, причем УПЧ опорного канала выполнен как нормирующий усилитель-формирователь, фазовращатели имеют фиксированный фазовый сдвиг, выход измерительного аттенюатора соединен со входом первого делителя мощности СВЧ, один из выходов которого соединен с первым плечом циркулятора, а второй - с сигнальным входом смесителя опорного канала, выход гетеродинного генератора соединен со входом второго делителя мощности, один из выходов которого соединен с гетеродинным входом смесителя опорного канала, а второй - с гетеродинным входом смесителя сигнального канала, второе плечо циркулятора соединено с измерительным резонатором, снабженным элементом перестройки его резонансной частоты, третье плечо циркулятора соединено со входом смесителя сигнального канала, а его выход - со входом УПЧ сигнального канала, выход которого соединен с сигнальными входами первого и второго синхронных детекторов, выход первого фазовращателя соединен с опорным входом одного из синхронных детекторов и со входом второго фазовращателя, выход которого соединен с опорным входом второго синхронного детектора, выход второго фазочастотного дискриминатора соединен с управляющим электродом гетеродинного генератора, а переключатель режимов работы выполнен трехпозиционным, в первом и втором положении обеспечивающим соединение управляющего частотой электрода сигнального генератора с выходом первого фазочастотного дискриминатора, а в третьем - с выходом первого синхронного детектора, во втором положении обеспечивающим дополнительное соединение выхода первого синхронного детектора с элементом перестройки резонансной частоты измерительного резонатора, а УПЧ опорного канала выполнен в виде нормирующего усилителя формирователя напряжения, при этом первый и второй фазовращатели ПЧ выполнены с фиксированным фазовым сдвигом и фазовый сдвиг второго составляет $\pm\pi/2$.

Недостатки устройства заключаются в том, что в режиме стабилизации частоты сигнального генератора по внешнему (абсолютному) эталону петля ФАПЧ работает с использованием сигнала, полученного смещением сигнала стабилизируемого генератора с одним из сигналов сетки частот, полученных умножением частоты опорного высокостабильного генератора, последующего выделения и усиления разностного сигнала специальным селективным усилителем. Такое решение обладает схемотехнической и конструктивной сложностью, имеет значительные габариты, потребляет заметную мощность и является источником дополнительных фазовых шумов стабилизируемого генератора.

Другим недостатком устройства является использование как для формирования сетки опорных частот, так и в качестве опорных сигналов в фазовых дискриминаторах и фазочувствительных (синхронных) детекторах сигнала фиксированной частоты опорного высокостабильного генератора, что затрудняет построение петель ФАПЧ с использованием интегрированных микроэлектронных решений.

Задачей изобретения является упрощение устройства, уменьшение его габаритов, потребляемой мощности и стоимости, уменьшение фазовых шумов генератора СВЧ,

реализация необходимой функциональности на типовых, серийно выпускаемых микроэлектронных компонентах.

Поставленная задача достигается за счет того, что когерентный супергетеродинный спектрометр электронного парамагнитного резонанса, включающий сигнальный и гетеродинный генераторы СВЧ, два делителя мощности СВЧ, смесители опорного и сигнального каналов, циркулятор с измерительным резонатором и элементом перестройки резонансной частоты измерительного резонатора, измерительный attenuator, усилители промежуточной частоты (УПЧ) опорного и сигнального каналов, два фазочастотных дискриминатора с фильтрами на выходах, два синхронных детектора, два фазовращателя ПЧ, опорный генератор и переключатель режимов работ, причем выход измерительного attenuatorа соединен со входом первого делителя мощности СВЧ, один из выходов которого соединен с первым плечом циркулятора, а второй - с сигнальным входом смесителя опорного канала, выход гетеродинного генератора соединен со входом второго делителя мощности, один из выходов которого соединен с гетеродинным входом смесителя опорного канала, а второй - с гетеродинным входом смесителя сигнального канала, второе плечо циркулятора соединено с измерительным резонатором, снабженным элементом перестройки его резонансной частоты, третье плечо циркулятора соединено со входом смесителя сигнального канала, а его выход - со входом УПЧ сигнального канала, выход которого соединен с сигнальными входами первого и второго синхронных детекторов, выход первого фазовращателя соединен с опорным входом одного из синхронных детекторов и со входом второго фазовращателя, выход которого соединен с опорным входом второго синхронного детектора, выход второго фазочастотного дискриминатора соединен с управляющим электродом гетеродинного генератора, а переключатель режимов работы выполнен трехпозиционным, в первом и втором положении обеспечивающим соединение управляющего частотой электрода сигнального генератора с выходом первого фазочастотного дискриминатора, а в третьем - с выходом первого синхронного детектора, во втором положении обеспечивающим дополнительное соединение выхода первого синхронного детектора с элементом перестройки резонансной частоты измерительного резонатора, а УПЧ опорного канала выполнен в виде нормирующего усилителя формирователя напряжения, при этом первый и второй фазовращатели ПЧ выполнены с фиксированным фазовым сдвигом и фазовый сдвиг второго составляет $\pm\pi/2$, дополнительно содержит два делителя частоты, устройство синтеза опорных частот, а сигнальный генератор оснащен дополнительным выходом, причем выход опорного генератора соединен со входом устройства синтеза опорных частот, один из выходов которого соединен с опорным входом первого фазочастотного дискриминатора, второй - с опорным входом второго фазочастотного дискриминатора, а третий - со входом первого фазовращателя, а вспомогательный выход сигнального генератора через первый делитель частоты соединен с сигнальным входом первого фазочастотного дискриминатора, вход второго делителя частоты соединен с выходом УПЧ опорного канала, а его выход - с опорным входом второго фазочастотного дискриминатора.

На чертеже представлена блок-схема когерентного супергетеродинного спектрометра ЭПР.

Спектрометр содержит сигнальный 1 и гетеродинный 2 генераторы СВЧ, измерительный attenuator 3, смеситель 4 опорного и смеситель 5 сигнального каналов, циркулятор 6 с измерительным резонатором 7, УПЧ 8 опорного и УПЧ 9 сигнального каналов, фазочастотные дискриминаторы 10 и 11, делители частоты 12 и 13, синхронные детекторы 14 и 15, фазовращатели 16 и 17, элемент перестройки резонансной частоты измерительного резонатора 18, делители СВЧ мощности 19 и 20, трехпозиционный переключатель 21 режимов работы, устройство синтеза опорных частот 22, опорный генератор 23.

Устройство работает следующим образом.

Сигнал с основного выхода сигнального генератора СВЧ 1, электрические колебания которого описываются функцией $\cos(\omega_m t)$, через измерительный attenuator 3, дающий набег фазы α , поступает на вход делителя мощности 19. Часть мощности ответвляется на сигнальный вход смесителя 4 опорного канала, достигая его с дополнительным набегом фазы ϕ_1 . На опорный вход этого смесителя через делитель мощности 20 подается сигнал гетеродинного СВЧ генератора 2, имеющий вид $\cos(\omega_L t + \lambda + \beta_1)$, где λ - фаза колебаний на выходе гетеродинного генератора, а β_1 - набег фазы на делителе мощности и соединительной линии. Разностный сигнал с выхода смесителя 4 усиливается УПЧ 8 опорного канала, характеризующимся широким динамическим диапазоном и малой зависимостью задержки (набега фазы)

от величины входного сигнала и подвергается делению частоты в N_2 раз соответствующим делителем частоты 12. Сигнал с выхода делителя частоты 12 подается на сигнальный вход фазочастотного дискриминатора 10 в виде

$$\cos\left(\frac{(\omega_L - \omega_M)t}{N_2} + \frac{\lambda + \beta_1 - \alpha - \varphi_1}{N_2} + \delta\right),$$

где δ описывает фазовый набег на пути от выхода смесителя 4 до входа 10.

Петля ФАПЧ по промежуточной частоте замыкается подачей выходного сигнала фазочастотного дискриминатора 10 через фильтр (на схеме не показан для упрощения) на вход гетеродинного генератора 2, управляющий его частотой. На опорный вход фазочастотного дискриминатора 10 подается высокостабильный сигнал

$$\cos\left(\frac{\Omega}{N_2}t + \gamma\right),$$

где Ω - промежуточная частота (ПЧ), а

γ - произвольная начальная фаза, с одного из выходов устройства синтеза опорных частот 22.

При захвате петли ФАПЧ выполняется условие равенства на входах частот

$$(\omega_L + \omega_M) = \Omega \quad (1)$$

и фаз

$$\frac{\lambda + \beta_1 - \alpha - \varphi_1}{N_2} + \delta = \gamma. \quad (2)$$

Основная часть СВЧ мощности сигнального генератора 1 через делитель мощности 19 поступает на первое плечо СВЧ циркулятора 6 и далее на измерительный резонатор 7, присоединенный к плечу 2 циркулятора. Отраженный от резонатора 7 сигнал возвращается в плечо 2 циркулятора и далее поступает в его плечо 3, соединенное с сигнальным входом смесителя 5 сигнального канала. Сигнал на этом входе описывается функцией

$$\Gamma' \cos(\omega_M t + \alpha + \varphi_2) + \Gamma'' \sin(\omega_M t + \alpha + \varphi_2),$$

где Γ' - вещественная часть комплексного коэффициента отражения резонатора 7, зависящая от сигнала поглощения ЭПР,

Γ'' - мнимая часть, зависящая от сигнала дисперсии ЭПР и расстройки резонатора относительно частоты падающей волны,

φ_2 - набег фазы СВЧ волны от входа делителя мощности 19 до входа смесителя 5.

С выхода смесителя 5 разностный сигнал поступает на вход УПЧ 9 сигнального канала и далее на сигнальные входы синхронных детекторов 14 и 15 в виде

$$\Gamma' \cos((\omega_L - \omega_M)t + \lambda + \beta_2 - \alpha - \varphi_2 + \eta) - \Gamma'' \sin((\omega_L - \omega_M)t + \lambda + \beta_2 - \alpha - \varphi_2 + \eta), \quad (3)$$

где η означает набег фазы от выхода смесителя 5 до входов синхронных детекторов 14 и 15.

В условиях захвата петли ФАПЧ по промежуточной частоте действуют соотношения (1) и (2) для частот и фаз, что приводит к тому, что сигнал (3) приобретает вид

$$\Gamma' \cos(\Omega t + (\gamma - \delta)N_2 - \beta_1 + \varphi_1 + \beta_2 - \varphi_2 + \eta) - \Gamma'' \sin(\Omega t + (\gamma - \delta)N_2 - \beta_1 + \varphi_1 + \beta_2 - \varphi_2 + \eta), \quad (4)$$

Таким образом, полученный сигнал на промежуточной частоте Ω содержит две квадратурные компоненты, одна из которых пропорциональна Γ' , т.е. сигналу поглощения ЭПР, а вторая Γ'' , т.е. сигналу дисперсии и расстройки измерительного резонатора.

Высокостабильный опорный сигнал $\cos(\Omega t)$ с одного из выходов устройства синтеза опорных частот 22 подается на вход фазовращателя 17, дающего фазовый набег θ . Сигнал с выхода фазовращателя 17 $\cos(\Omega t + \theta)$ поступает на опорный вход смесителя 14 и на второй фазовращатель 16, поворачивающий фазу на $\pm \pi/2$. Так, взяв, для определенности, сдвиг $-\pi/2$, получим на выходе фазовращателя 16, соединенного с опорным входом смесителя 15, $\sin(\Omega t + \theta)$. В результате смешения и выделения разностной частоты получим на выходе 15

$$\Gamma' \sin((\gamma - \delta)N_2 - \beta_1 + \varphi_1 + \beta_2 - \varphi_2 + \eta - \theta) - \Gamma'' \cos((\gamma - \delta)N_2 - \beta_1 + \varphi_1 + \beta_2 - \varphi_2 + \eta - \theta), \quad (5)$$

и на выходе 14

$$\Gamma' \cos((\gamma - \delta)N_2 - \beta_1 + \varphi_1 + \beta_2 - \varphi_2 + \eta - \theta) - \Gamma'' \sin((\gamma - \delta)N_2 - \beta_1 + \varphi_1 + \beta_2 - \varphi_2 + \eta - \theta), \quad (6)$$

Фазовый угол, входящий в тригонометрические функции (5) и (6), не содержит существенно переменной величины α , зависящей от установки измерительного аттенюатора 3, а определяется только постоянными фазовыми сдвигами в различных цепях устройства. Таким образом, задав сдвиг фазы θ фазовращателя 17 так, чтобы фазовый угол $(\gamma - \delta)N_2 - \beta_1 + \phi_1 + \beta_2 - \phi_2 + \theta$ был равен $\pi/2$ или $3\pi/2$, получаем на выходе 15 чистый сигнал поглощения, а на выходе 14 - сигнал, пропорциональный дисперсии и расстройке измерительного резонатора независимо от частоты измерительного генератора 1, его расстройки относительно резонансной частоты измерительного резонатора 7 и уровня мощности. Опорным сигналом для работы устройства синтеза опорных частот 22 является выходной сигнал высокостабильного опорного генератора 23 на удобной для работы 22 частоте.

В устройстве предусмотрены три режима стабилизации частоты измерительного генератора 1 и резонансной частоты измерительного резонатора 7. Для абсолютной стабилизации (стабилизации по высокостабильному эталону) частоты сигнального генератора используется вспомогательный выход частоты сигнального генератора 1. В случае его отсутствия он без труда может быть создан путем включения направленного ответвителя на основной (единственный) выход генератора. Сигнал СВЧ со вспомогательного выхода подвергается делению делителем частоты 13 в N_1 раз до частоты, удобной для сравнения на фазочастотном дискриминаторе 11, и поступает на его сигнальный вход в виде

$$\cos\left(\frac{\omega_m t}{N_1}\right)$$

дискриминатора подается высокостабильный сигнал с одного из выходов устройства синтеза опорных частот 22 вида

$$\cos\left(\frac{\omega_{m0} t}{N_1}\right), \text{ где } \omega_{m0} - \text{номинальная частота}$$

измерительного генератора. В положении «1» переключателя рода работ 21 петля ФАПЧ по частоте сигнального генератора замыкается путем подачи сигнала отработки с выхода 11 через соответствующий фильтр (для простоты не показан) на электрод, управляющий частотой 1. Частота сигнального генератора 1 стабилизируется на значении ω_{m0} , что позволяет провести подстройку резонансной частоты измерительного резонатора 7 до совпадения с ω_{m0} . В положении «2»

переключателя рода работ 21 сигнал с выхода синхронного детектора 14 в соответствующей фазе подается на элемент перестройки резонансной частоты 18 измерительного резонатора 7 для автоматической подстройки его резонансной частоты под стабилизированный сигнальный генератор 1. Наконец, в третьем положении 21 сигнал с выхода синхронного детектора 14 используется для подстройки частоты генерации 1 под мгновенное значение резонансной частоты измерительного резонатора 7, для чего он в соответствующей фазе подается на управляющий частотой электрод 1.

Таким образом, функционирование спектрометра, в том числе выделение чистых сигналов поглощения и дисперсии, обеспечивается при использовании стандартной, коммерчески доступной элементной базы (делители частоты, синтезаторы частоты с фазочастотными дискриминаторами), что обеспечивает уменьшение габаритов, потребляемой мощности и цены устройства, повышает его технологичность и надежность, уменьшает фазовый шум.

Формула изобретения

Когерентный супергетеродинный спектрометр электронного парамагнитного резонанса, включающий сигнальный и гетеродинный генераторы СВЧ, два делителя мощности СВЧ, смесители опорного и сигнального каналов, циркулятор с измерительным резонатором и элементом перестройки резонансной частоты измерительного резонатора, измерительный аттенюатор, усилители промежуточной частоты (УПЧ) опорного и сигнального каналов, два фазочастотных дискриминатора с фильтрами на выходах, два синхронных детектора, два фазовращателя ПЧ, опорный генератор и переключатель режимов работ, причем выход измерительного аттенюатора соединен со входом первого делителя мощности СВЧ, один из выходов которого соединен с первым плечом циркулятора, а второй - с сигнальным входом смесителя опорного канала, выход гетеродинного генератора соединен со входом второго делителя мощности, один из выходов которого соединен с гетеродинным входом смесителя опорного канала, а второй - с гетеродинным входом смесителя сигнального канала, второе плечо циркулятора соединено с измерительным резонатором, снабженным элементом перестройки его резонансной частоты, третье плечо циркулятора соединено со входом смесителя сигнального канала, а его выход -

со входом УПЧ сигнального канала, выход которого соединен с сигнальными входами первого и второго синхронных детекторов, выход первого фазовращателя соединен с опорным входом одного из синхронных детекторов и со входом второго фазовращателя, выход которого соединен с опорным входом второго синхронного детектора, выход второго фазочастотного дискриминатора соединен с управляющим электродом гетеродинного генератора, а переключатель режимов работы выполнен трехпозиционным, в первом и втором положении обеспечивающим соединение управляющего частотой электрода сигнального генератора с выходом первого фазочастотного дискриминатора, а в третьем - с выходом первого синхронного детектора, во втором положении обеспечивающим дополнительное соединение выхода первого синхронного детектора с элементом перестройки резонансной частоты измерительного резонатора, а УПЧ опорного канала выполнен в виде нормирующего усилителя формирователя напряжения, при этом первый и второй фазовращатели ПЧ выполнены с фиксированным фазовым сдвигом и фазовый сдвиг второго составляет $\pm\pi/2$, отличающийся тем, что он дополнительно содержит два делителя частоты, устройство синтеза опорных частот, а сигнальный генератор оснащен дополнительным выходом, причем выход опорного генератора соединен со входом устройства синтеза опорных частот, один из выходов которого соединен с опорным входом первого фазочастотного дискриминатора, второй - с опорным входом второго фазочастотного дискриминатора, а третий - со входом первого фазовращателя, а вспомогательный выход сигнального генератора через первый делитель частоты соединен с сигнальным входом первого фазочастотного дискриминатора, вход второго делителя частоты соединен с выходом УПЧ опорного канала, а его выход с опорным входом второго фазочастотного дискриминатора.

ИЗВЕЩЕНИЯ

ММ4А Досрочное прекращение действия патента из-за неуплаты в установленный срок пошлины за поддержание патента в силе

Дата прекращения действия патента: **12.04.2016**

Дата публикации: [20.12.2016](#)

ММ4А Досрочное прекращение действия патента из-за неуплаты в установленный срок пошлины за поддержание патента в силе

Дата прекращения действия патента: **12.04.2016**

Дата внесения записи в Государственный реестр: **08.12.2016**

Дата публикации: [20.12.2016](#)